DOI: 10.24850/j-tyca-2018-02-09

Nota

Cuantificación con el SPEI de sequías históricas y bajo cambio climático probable en la estación climatológica Zacatecas, México

Quantification with SPEI of historical droughts and under probable climatic change in the Zacatecas weather station, Mexico

Daniel Francisco Campos-Aranda[1]

[1]Profesor jubilado, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México, campos_aranda@hotmail.com

Autor para correspondencia: Daniel Francisco Campos-Aranda, campos_aranda@hotmail.com

Resumen

El SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index) es una variante del ampliamente difundido SPI (Standardized Precipitation Index), que tiene un mayor potencial como *índice de sequías*, al ser sensitivo al cambio climático, debido a que usa una medida más real de la disponibilidad de agua: el *balance climático*. Esta medida se evalúa con la diferencia entre precipitación y evapotranspiración potencial mensuales. En este estudio se describe con detalle el procedimiento operativo del SPEI y se aplica a los registros históricos mensuales disponibles de precipitación y temperatura media en la estación climatológica Zacatecas, ubicada en la capital del estado de Zacatecas, México, los cuales abarcan 86 años (1930-2015). Para las *sequías históricas*, los resultados del SPEI definen para las sequías leves, moderadas, severas y extremas los siguientes valores aproximados: 32.2, 11.5, 5.0 y 1.3%. Para esta ubicación del país se consideró conveniente formular tres escenarios del *cambio climático*: el primero

acepta una reducción progresiva y lineal de 20% en la precipitación anual; el segundo adopta un aumento progresivo y lineal de 4 °C en la temperatura media anual, y el tercero sobrepone los dos efectos citados y, por lo tanto, es el más crítico. En los tres escenarios planteados se encuentra que las sequías leves y extremas aumentan de forma somera en número o porcentaje, y que las sequías moderadas y severas disminuyen también de manera mesurada. Se exponen los gráficos de evolución del SPEI de duración de 12 meses, histórico y del tercer escenario, en los cuales se visualizan con claridad las épocas de ocurrencia de los periodos de sequía, así como de las diferencias puntuales en el valor del SPEI. Con base en los resultados de estos análisis, se recomienda la aplicación sistemática del SPEI en la caracterización de las sequías históricas y *futuras*. En estas últimas, los resultados tienen sólo un carácter orientativo.

Palabras clave: índice SPEI, distribución Log-logística, momentos de probabilidad ponderada, evapotranspiración potencial, homogeneidad estadística, cambio climático.

Abstract

The SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index) is a variant of the widely used SPI (Standardized Precipitation Index). It has greater potential as a drought index since it is sensitive to climate change, given that it uses a more realistic measure of the water availability, namely, the climate balance. This measure is represented by the difference between monthly precipitation and potential evapotranspiration. This study describes in detail the calculation of the SPEI and its application to the monthly historical precipitation and average temperature records available from the Zacatecas weather station, located in the capital of the state of Zacatecas, Mexico. The data covers 86 years over the period 1930 to 2015. For historical droughts, the SPEI results indicate approximate values of 32.2, 11.5, 5.0 and 1.3% for light, moderate, severe and extreme droughts, respectively. For this particular location, three climatic change scenarios were proposed: the first one adopts a progressive and linear reduction of 20% in annual precipitation; the second one adopts a progressive and linear increase of 4 °C in the average temperature, and the third superimposes the two effects mentioned, which is therefore the most critical. For the three proposed scenarios, the results suggest that light and extreme droughts slightly increase in number or percentage, and that moderate and severe droughts decrease also only slightly. Results are shown with three types of graphs: the SPEI evolution for 12 months, a historical

graph, and third clearly show the times of occurrence of drought periods as well as specific differences in the SPEI value. Based on these analyses, a systematic application of the SPEI for the characterization of historical and future droughts is recommended. Its application for future droughts would only be indicative.

Keywords: SPEI index, Log-Logistic distribution, probability weighted moments, potential evapotranspiration, statistical homogeneity, climate change.

Fecha de recibido: 30/03/2016

Fecha de aceptado: 02/04/2017

Introducción y objetivo

Las *sequías* son una de las causas naturales principales de daños en la agricultura, en todas las actividades económicas y en el medio ambiente. Las sequías aparecen después de largos periodos de precipitación escasa. Debido a su lenta evolución es difícil precisar su inicio y final, así como estimar sus características de magnitud, duración y extensión territorial. Por otra parte, debido al crecimiento sostenido de la demanda de agua para todos los usos y a la amenaza del cambio climático, en años recientes se ha intensificado el estudio de las sequías (Mishra & Singh, 2010; Vicente-Serrano, Beguería, & López-Moreno, 2010).

Como las sequías son un fenómeno y amenaza natural, su mejor caracterización se lleva a cabo empleando *indicadores*, que son variables climáticas, hidrológicas, agrícolas y/o socioeconómicas que muestran de forma numérica el potencial de las sequías en relación con las deficiencias y daños que producen. Un *índice de sequías* es un método basado en cálculos estadísticos que emplea indicadores y busca cuantificar las sequías, permitiendo con ello su comparación en climas y regímenes hidrológicos disímiles; además, favorece el desarrollo de

acciones de mitigación correctas y eficientes de sus impactos negativos (Mishra & Singh, 2010; Fuchs, Svoboda, Wilhite, & Hayes, 2014).

Otro aspecto importante de las sequías es su carácter de múltiples escalas de tiempo (*multiescalar*), lo cual se origina por los *retrasos* que ocurren en el aprovechamiento del agua en los diferentes sistemas hidráulicos, de manera que las deficiencias de la precipitación primero son visibles en la agricultura de temporal; después, en el abastecimiento del riego, generación de energía hidroeléctrica y otros usos del agua; y, por último, en los impactos sociales, económicos y ambientales. Por lo anterior, las sequías se clasifican como *meteorológicas*, *agrícolas*, *hidrológicas* y *socioeconómicas*. Estas últimas incluyen los daños ambientales (Pandey, Sharma, Mishra, Singh, & Agarwal, 2008; Vicente-Serrano *et al*., 2010; Fuchs *et al*., 2014).

Desde finales del siglo pasado, los estudios de sequías y el desarrollo de sus sistemas de alerta y monitoreo se han basado en el PDSI (Palmer Drought Severity Index) y el SPI (Standardized Precipitation Index); el primero a partir de un balance de humedad en el suelo (Palmer, 1965; Wells, Goddard, & Hayes, 2004) y el segundo en un enfoque probabilístico de la precipitación (McKee, Doesken, & Kleist, 1993; Wu, Svoboda, Hayes, Wilhite, & Wen, 2007). El PDSI ha sido criticado por no tener carácter multiescalar en el tiempo ni un cálculo simple, además de no ser suficientemente sensitivo a los cambios inducidos en la precipitación y temperatura. El SPI ha mostrado un uso eficiente de la información disponible y su crítica principal consiste en utilizar sólo datos de precipitación mensual, ignorando con ello otros indicadores de las sequías, como temperatura y evapotranspiración potencial.

Siendo las sequías un fenómeno natural complejo y de impactos amplios, recientemente se ha buscado su caracterización a través de índices basados en múltiples variables. Hao y Singh (2015) describen los diversos enfoques de construcción de los *índices multivariados*; entre los más conocidos están el uso del balance hídrico edafológico, y de las *variables ocultas* o latentes. Una variable oculta se forma con una diferencia o cociente de variables que tienen gran significado físico en las sequías, por ejemplo, la precipitación y evapotranspiración potencial, así se propuso el RDI (Reconnaissance Drought Index) con el cociente de tales variables (Tsakiris & Vangelis, 2005; Campos-Aranda, 2015) y el SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index) con su diferencia, que implica una condición de déficit o exceso de agua. El SPEI es un nuevo índice de sequías propuesto por Vicente-Serrano *et al.* (2010), y Beguería, Vicente-Serrano, Reig y Latorre (2014) de cálculo similar al SPI, que es multiescalar y sensitivo a las alteraciones inducidas en los registros históricos de precipitación y temperatura, de

acuerdo con las expectativas que presenta el cambio climático en tal zona o región. Una aplicación del SPEI con tal enfoque ha sido expuesta por Törnros y Menzel (2014) para una zona de medio oriente.

El *objetivo* del presente estudio consiste en describir con detalle el procedimiento operativo del SPEI y realizar su aplicación en el registro histórico disponible de precipitación y temperatura media de la estación climatológica Zacatecas, localizada en la ciudad capital del mismo nombre del estado de Zacatecas, México. Tal registro abarca 86 años en el lapso de 1930 a 2015. Se procesan diez duraciones de sequía, que variaron de 3 a 60 meses, y se analizan tres escenarios para el cambio climático probable: el primero considera una reducción progresiva y lineal, que alcanza un 20% de la precipitación anual; el segundo adopta un aumento progresivo y lineal, que llega a los 4 °C en la temperatura media anual; el tercero, el más crítico, combina los efectos negativos de ambas alteraciones. Con base en los porcentajes que define el SPEI para las sequías leves, moderadas, severas y extremas, se realiza el contraste de resultados y se formulan las conclusiones.

Resumen de la teoría operativa

Cálculo del SPEI

El SPI ha sido aplicado utilizando diversas *duraciones k* de sequías, que variaron de 3 a 72 meses (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). El registro de precipitación mensual se procesa bajo el esquema de *sumas móviles*, de manera que para la duración de tres meses, la primera secuencia se obtiene sumando los datos históricos 1, 2 y 3; la segunda secuencia es la suma de los datos 2, 3 y 4, y así sucesivamente, hasta la última secuencia, que la forman los datos antepenúltimo, penúltimo y último. Entonces, el número de secuencias *ns* que se pueden formar depende de *k* y está definido por la expresión:

$ns = 12 \cdot NA - k + 1$ (1)

en la cual, *NA* es el número de años completos del registro procesado (> 30 años). La diferencia fundamental entre el cálculo del SPI y del SPEI radica en que el segundo emplea como datos históricos las diferencias ($D_{j,i}$) entre la precipitación mensual ($P_{j,i}$) y la evapotranspiración potencial mensual ($ETP_{j,i}$); esto es:

$D_{j,i} = P_{j,i} - ETP_{j,i}$ (2)

Lógicamente, *j* varía de 1 a 12, e *i* de 1 a *NA*. Para proseguir con el cálculo del SPEI, primero se forman las secuencias de diferencias designadas por D_t^k, en las cuales *t* varía de 1 a *ns*. Al tomar en cuenta que la mayoría de las diferencias D_t^k es negativa, surge la necesidad de emplear un modelo probabilístico de tres parámetros de ajuste, cuyo parámetro de ubicación *u* sea menor que la más pequeña de las secuencias por procesar. Vicente-Serrano *et al.* (2010) y Beguería *et al*. (2014) contrastaron cuatro distribuciones: Log-Normal, Pearson tipo III, General de Valores Extremos y Log-Logística; recomiendan la última, ajustada mediante el método de los momentos de probabilidad ponderada (β_s) sesgados, cuyas ecuaciones son (Stedinger, Vogel, & Foufoula-Georgiou, 1993; Vicente-Serrano *et al.*, 2010):

$$\beta_s = \frac{1}{ns}\sum_{l=1}^{ns}(1-F_l)^s \cdot D_l^k \qquad \text{con } s = 0, 1, 2 \qquad (3)$$

siendo:

$$F_l = \frac{l-0.35}{ns} \qquad (4)$$

En la ecuación (3), las secuencias se utilizan ordenadas en forma creciente $\left(D_1^k \le D_2^k \le \cdots \le D_{ns}^k\right)$. Beguería *et al*. (2014) han propuesto utilizar los β_s insesgados, cuando los estimadores sesgados no conducen a una solución numérica. Stagge, Tallaksen, Gudmundsson, Van Loon y Stahl (2015) han sugerido emplear la distribución General de Valores Extremos, ajustada con el método de máxima verosimilitud. La ecuación de la función de distribución de probabilidades acumuladas [$F(x)$] de la distribución Log-Logística es (Haktanir, 1991):

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{x-u}{\alpha}\right)^{-1/\gamma}\right]^{-1} \qquad (5)$$

siendo $\gamma > 0$, $\alpha > 0$ y $u < x_{mo}$ los parámetros de forma, escala y ubicación; x_{mo} es la secuencia mínima observada. Los valores de los parámetros de ajuste se estiman con las siguientes expresiones (Haktanir, 1991):

$$\gamma = 3 - \frac{2\cdot(\beta_0 - 3\cdot\beta_2)}{(\beta_0 - 2\cdot\beta_1)} \qquad (6)$$

$$\alpha = \frac{(\beta_0 - 2\cdot\beta_1)}{\gamma\cdot\Gamma(1+\gamma)\cdot\Gamma(1-\gamma)} \qquad (7)$$

$$u = \beta_0 - \alpha\cdot\Gamma(1+\gamma)\cdot\Gamma(1-\gamma) \qquad (8)$$

en las cuales, $\Gamma(\cdot)$ es la función factorial Gamma; se estimó con la fórmula de Stirling (Davis, 1972):

$$\Gamma(\varepsilon) \cong e^{-\varepsilon}\cdot\varepsilon^{\varepsilon-1/2}\cdot\sqrt{2\pi}\cdot\left(1 + \frac{1}{12\cdot\varepsilon} + \frac{1}{288\cdot\varepsilon^2} - \frac{139}{51840\cdot\varepsilon^3} - \frac{571}{2488320\cdot\varepsilon^4} + \cdots\right) \qquad (9)$$

Calculados los tres parámetros de ajuste (γ, α, *u*) de cada duración *k* analizada, se aplica a la ecuación (5) con $x = D_t^k$ para estimar las probabilidades de no excedencia *F*(*x*) que corresponden a cada diferencia. Después se emplea la aproximación numérica racional, desarrollada por Zelen y Severo (1972), y expuesta por Campos-Aranda (2015), para convertir la *F*(*x*) en la variable normal estandarizada *Z* de media cero y varianza unitaria, la cual corresponde al SPEI. Las sequías leves, moderadas, severas y extremas se definen cuando el SPEI varía de 0 a -1.00, de -1.00 a -1.50, de -1.50 a -2.00 y cuando es menor que -2.00, respectivamente.

Cálculo de la *ETP* mensual

Mavromatis (2007) encontró que el uso de métodos simples o complejos para estimación de la $ETP_{j,i}$ conduce a resultados similares cuando se aplican índices de sequía como el de Palmer. Con base en tal resultado, Vicente-Serrano *et al.* (2010) adoptan un enfoque simple para estimar la $ETP_{j,i}$, a través de la fórmula de Thornthwaite, cuya expresión es:

$$ETP_{j,i} = 16 \cdot Fc \cdot \left(\frac{10 \cdot Tt_{j,i}}{IC_i} \right)^m \quad (10)$$

en la cual *Fc* es un factor correctivo, función de la latitud del lugar (LAT) y del número de días del mes (*ndm*); su fórmula es:

$$Fc = \left(\frac{N}{12} \right) \cdot \left(\frac{ndm}{30} \right) \quad (11)$$

en donde *N* es el soleamiento máximo o número máximo de horas con sol promedio mensuales. Para su estimación en la república mexicana, Campos-Aranda (2005) desarrolló la siguiente expresión empírica:

$$N = A + B\,[\text{sen}\,(30\,nm + 83.5)] \qquad (12)$$

en la cual, *nm* es el número de mes, con 1 para enero y 12 para diciembre; *A* y *B* son constantes función de LAT en grados, con las expresiones siguientes:

$$A = 12.09086 + 0.00266 \cdot \text{LAT} \qquad (13)$$

$$B = 0.2194 - 0.06988 \cdot \text{LAT} \qquad (14)$$

$Tt_{j,i}$ es la temperatura media mensual en °C e IC_i es un índice de calor anual, igual a la suma de los 12 mensuales, que son:

$$icm = \left(\frac{Tt_{j,i}}{5}\right)^{1.514} \qquad (15)$$

Por último, el exponente *m* es función de IC_i con la siguiente ecuación empírica:

$$m = 6.75 \cdot 10^{-7} \cdot IC_i^3 - 7.71 \cdot 10^{-5} \cdot IC_i^2 + 1.792 \cdot 10^{-2} \cdot IC_i + 0.4924 \qquad (16)$$

Para valores de $Tt_{j,i}$ mayores de 26.5 °C no existe influencia del IC_i, por lo cual la $ETP_{j,i}$ es sólo función de $Tt_{j,i}$ y está tabulada en Campos-Aranda (2005).

Escenarios hipotéticos del cambio climático

Vicente-Serrano *et al.* (2010) y Ma *et al*. (2014) han sugerido que como consecuencia de los procesos del cambio climático se deben estudiar al menos dos escenarios. El primero es una reducción en la precipitación y el segundo un aumento en la temperatura media. Con base en los análisis cuantitativos realizados por estos autores y las proyecciones climáticas para México de Montero, Martínez, Castillo y Espinoza (2010), se establecieron tres escenarios por analizar: (1) una reducción progresiva y lineal de 20% en la precipitación anual del registro histórico; (2) un aumento progresivo y lineal de 4 °C en el registro de temperatura media anual, y (3) la superposición de ambos cambios en el registro histórico. Los cambios citados tienen impacto directo en la severidad y duración de las sequías (Fuchs *et al*., 2014). La corrección del registro mensual de precipitación ($PM_{j,i}$) se realiza con base en la ecuación siguiente:

$$PM_{j,i} = PM_{j,i} - (\Delta_P \cdot i \cdot PM_{j,i}) \qquad (17)$$

en la cual, Δ_P es la pendiente de la reducción y por lo tanto igual al cociente de 0.20 entre el número de años NA e *i* es el contador de años, variando de 1 a *NA*. La corrección de registro de temperatura media mensual ($TM_{j,i}$) se efectúa con la ecuación:

$$TM_{j,i} = TM_{j,i} + (\Delta_T \cdot i) \qquad (18)$$

ahora, Δ_T es la pendiente del incremento y por ello igual al cociente de 4 °C entre *NA*.

Datos procesados y sus resultados

Registros históricos disponibles

La estación climatológica Zacatecas se ubica en la ciudad del mismo nombre, que es la capital del estado de Zacatecas, México, la cual, de acuerdo con la información histórica proporcionada por la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), ha operado de forma continua y no ha sufrido cambios de ubicación, por lo que su registro puede ser considerado confiable. Sus coordenadas geográficas son las siguientes: latitud 22° 45’ N, longitud 102° 34’ WG, y altitud de 2 485 msnm. Sus registros mensuales disponibles de precipitación (mm) y temperatura media (°C) en los archivos en Excel de la Conagua de Zacatecas inician en enero de 1953 y están disponibles hasta diciembre de 2015, con datos faltantes en abril de 1986 y varios meses de los años 2010 a 2013.

Los primeros datos faltantes se adoptaron igual a las medias mensuales y los restantes se consideraron igual a los valores registrados en los mismos meses en la estación climatológica Guadalupe, que dista unos 6 km en línea recta y se ubica dentro de la misma subregión geográfica. Lo anterior se consideró aceptable debido a la similitud que muestran a nivel anual ambos registros tanto en precipitación como en temperatura media. Por otra parte, en el *Boletín Climatológico* No. 3 (SARH, 1980) de la Región Hidrológica No. 37 (El Salado), los registros disponibles de la estación Zacatecas de precipitación y temperatura media mensuales inician en enero de 1930 y llegan hasta diciembre de 1978. Entonces, el lapso de enero de 1930 a diciembre de 1952 sin datos faltantes se tomó de tal *Boletín* y con ello se integró un registro conjunto de *NA* = 86 años. Los 12 valores promedio mensuales del registro integrado de precipitación son los siguientes: 16.2, 9.6, 5.7, 7.5, 17.7, 80.0, 102.1, 97.9, 85.4, 35.4, 12.8 y 12.0, cuya suma es de 482.2 mm, magnitud

que corresponde a la precipitación media anual. Los del registro de temperatura media mensual son 11.7, 12.7, 14.8, 17.1, 19.0, 19.0, 17.5, 17.6, 17.0, 16.1, 14.1 y 12.3, con un valor promedio anual de 15.7 °C.

Pruebas de homogeneidad en los registros históricos

A partir de los registros históricos mensuales se integraron los de valores anuales de precipitación y temperatura media, a los cuales se les aplicaron tres pruebas básicas (Helmert, Secuencias y Von Neumann) y seis específicas: dos de persistencia (Anderson y Sneyers); dos de tendencia (Kendall y Spearman); una de cambio en la variabilidad (Bartlett), y otra de cambio en la media (Cramer). Estas pruebas se pueden consultar en WMO (1971), Campos-Aranda (2005), y Machiwal y Jha (2012).

El registro de precipitación anual es perfectamente homogéneo, ya que ninguna prueba general ni específica detectó componentes determinísticas. En cambio, el registro de temperatura media anual resultó no homogéneo, según las pruebas básicas; con base en las específicas, muestra persistencia y cambio en la media. Esta evidencia de falta de homogeneidad justifica el planteamiento de los escenarios relativos al cambio climático.

Resultados del SPEI con los registros históricos

Para este estudio se decidió analizar las siguientes 10 duraciones *k* de sequías: 3, 6, 9, 12, 18, 24, 30, 36, 48 y 60 meses. En la Tabla 1 se han concentrado los resultados obtenidos con los registros históricos

disponibles para cada duración según cuatro conceptos: (1) los relativos a las propiedades estadísticas de las secuencias formadas, (2) los correspondientes al ajuste de la distribución Log-Logística, (3) los asociados con los indicadores estadísticos del SPEI y (4) los pertenecientes a los tipos de sequías definidas.

El primer grupo de resultados da idea de la variabilidad y sesgo de las secuencias formadas con el criterio de sumas móviles, de manera que el segundo grupo, que son los parámetros de ajuste de la distribución, están relacionados con tal comportamiento. El tercer grupo de resultados es el más importante, pues define la calidad del ajuste logrado y, por lo tanto, la confiabilidad de las estimaciones realizadas con el SPEI, ya que la media, varianza y porcentaje de sequías que define debe ser 0, la unidad y 50%, respectivamente. Conforme tales indicadores se aproximen a los valores citados, la estimación será mejor o más confiable.

Con respecto a la Tabla 2, las estimaciones más exactas resultaron ser las de duraciones de 12, 24 y 36 meses, definiendo unos porcentajes aproximados de 32.2, 11.5, 5.0 y 1.3% de sequías leves, moderadas, severas y extremas, respectivamente. En la Figura 1a se muestra la evolución histórica del SPEI con duración de 12 meses, observando que en general se tiene una alternancia de lapsos húmedos y secos. La sequía de mayor duración inició hacia la secuencia 153 (septiembre de 1941) y concluyó en la 416 (agosto de 1963). La fecha que corresponde a una secuencia se obtiene despejando de la ecuación (1) el valor de *NA* en años, el cual se suma al año inicial del registro. En este lapso ocurre el valor del SPEI más extremo, con -2.742, en la secuencia 321 (octubre de 1954).

Resultados del SPEI con los registros climáticos alterados

Con base en las ecuaciones (17) y (18) se modificaron los registros históricos para incorporar un decremento progresivo y lineal de 20% en la precipitación anual, y un aumento también progresivo y lineal de 4 °C en la temperatura media anual. En la Tabla 1 se citan diversos valores

relevantes de los registros históricos, y de los alterados o modificados según posible cambio climático, así como de los valores anuales de la *ETP* estimada con el método de Thornthwaite.

Tabla 1. Valores característicos de los registros climáticos históricos y de sus versiones hipotéticas según el cambio climático probable, en la estación climatológica Zacatecas, México.

Registro anual de	**Valor histórico**		**Mínimo**		**Máximo**		**Valor medio**
	Inicial	**Final**	**Valor**	**Año**	**Valor**	**Año**	
Precipitación histórica (mm)	630.9	1019.0	169.3	1969	1019.0	2015	482.2
Temperatura media (°C)	15.2	16.2	14.2	1985	16.8	1962	15.7
ETP (mm) con método de Thornthwaite (THW)	736.6	763.9	704.7	1985	792.9	1962	752.8
Precipitación con reducción progresiva de 20% (mm)	629.4	815.2	145.3	2011	880.9	1935	432.9
Temperatura media con aumento progresivo a 4 °C	15.2	20.2	15.1	1931	20.4	2006	17.8
ETP (mm) de THW y temperatura media con aumento	738.1	950.7	735.5	1931	975.3	2006	833.6

De manera similar a la Tabla 2, en la Tabla 3 se exponen los resultados del SPEI para el registro alterado según el tercer escenario, es decir, considerando el efecto combinado de ambas modificaciones. Por

limitación de espacio no se muestran los resultados del SPEI con reducción de la precipitación ni con aumento de la temperatura media, pero están disponibles con el autor. Con base en todos los resultados del SPEI, se definió la duración de 24 meses como la idónea para el contraste entre los valores obtenidos con el registro histórico y los alterados. Tal contraste se muestra en la Tabla 4.

Tabla 2. Resultados del SPEI con los datos mensuales históricos de la estación climatológica Zacatecas, México.

Conceptos numéricos	**Duración en meses de las secuencias analizadas**									
	3	**6**	**9**	**12**	**18**	**24**	**30**	**36**	**48**	**60**
De las secuencias										
Número de secuencias	1 030	1 027	1 024	1 021	1 015	1 009	1 003	997	985	973
Suma móvil mínima	-255.0	-389.6	-513.3	-668.6	-867.1	-1 059.0	-1 322.5	-1 487.3	-1 923.4	-2 214.9
Suma móvil máxima	385.4	398.7	352.1	284.2	429.7	295.2	310.5	43.8	-276.6	-373.2
Media aritmética	-67.6	-135.4	-203.9	-273.1	-412.9	-552.7	-692.2	-832.2	-1 110.7	-1 389.4
Desviación estándar	100.2	135.0	150.4	156.4	214.5	234.5	278.2	289.4	337.9	380.6
Coeficiente de asimetría	1.000	0.799	0.640	0.548	0.525	0.539	0.546	0.451	0.234	0.145
De la FDP (LL3)										
Parámetro de forma (γ)	0.170	0.148	0.109	0.097	0.080	0.090	0.090	0.084	0.063	0.043
Parámetro de escala (α)	306.080	488.254	756.282	892.865	1 488.127	1436.100	1701.987	1910.519	3054.045	5010.527

Parámetro de ubicación (*u*)	-388.266	-641.009	-974.253	-1178.795	-1915.196	-2006.586	-2415.228	-2763.020	-4181.373	-6410.325
Del SPEI										
Media aritmética	-0.0008	-0.0006	-0.0033	-0.0042	-0.0061	-0.0049	-0.0050	-0.0053	-0.0070	-0.0114
Varianza	0.9994	0.9939	0.9956	0.9987	0.9966	0.9979	0.9980	1.0011	1.0079	1.0154
Valor mínimo	-2.438	-2.287	-2.311	-2.742	-2.247	-2.334	-2.445	-2.405	-2.408	-2.134
Número de valores negativos	539	519	524	517	496	508	510	504	501	481
% de sequías	52.3	50.5	51.2	50.6	48.9	50.3	50.8	50.6	50.9	49.4
De los tipos de sequías										
% de sequías leves	36.2	32.0	33.5	32.8	29.4	32.0	33.6	33.0	29.7	27.9
% de sequías moderadas	8.5	12.2	10.6	11.8	13.3	11.3	10.7	11.4	17.5	17.6
% de sequías severas	6.0	5.6	5.8	4.8	5.2	5.7	4.9	4.2	2.1	3.3
% de sequías extremas	1.6	0.8	1.3	1.3	1.0	1.3	1.7	1.9	1.5	0.7

Tabla 3. Resultados del SPEI con los registros mensuales alterados con efectos combinados (reducción de la precipitación y aumento de la temperatura media), en la estación climatológica Zacatecas, México.

Conceptos numéricos	**Duración en meses de las secuencias analizadas**									
	3	**6**	**9**	**12**	**18**	**24**	**30**	**36**	**48**	**60**
De las secuencias										

Número de secuencias	1030	1027	1024	1021	1015	1009	1003	997	985	973
Suma móvil mínima	-324.9	-474.3	-632.2	-766.5	-1143.5	-1409.6	-1827.0	-2035.6	-2487.3	-2994.2
Suma móvil máxima	374.1	382.3	278.9	165.0.	395.9	259.6	265.5	-4.2	-347.8	-433.3
Media aritmética	-100.2	-200.4	-301.1	-402.3	-606.4	-810.2	-1013.7	-1217.2	-1622.9	-2029.6
Desviación estándar	92.8	127.1	147.8	161.3	225.3	261.8	315.6	349.8	435.1	510.2
Coeficiente de asimetría	0.858	0.799	0.658	0.586	0.671	0.663	0.639	0.596	0.542	0.590
De la FDP (LL3)										
Parámetro de forma (γ)	0.111	0.115	0.090	0.076	0.084	0.078	0.074	0.070	0.086	0.104
Parámetro de escala (α)	445.425	94.791	892.728	1164.482	1462.824	1816.866	2324.999	2725.995	2784.609	2683.450
Parámetro de ubicación (u)	-554.178	-807.591	-1204.922	-1576.584	-2084.635	-2643.534	-3357.198	-3962.384	-4438.525	-4758.173
Del SPEI										
Media aritmética	-0.0053	-0.0041	-0.0062	-0.0081	-0.0070	-0.0080	-0.0085	-0.0091	-0.0061	-0.0045
Varianza	1.0015	0.9958	0.9968	0.9991	0.9989	0.9988	0.9990	0.9999	1.0001	1.0005
Valor mínimo	-2.810	-2.486	-2.444	-2.401	-2.569	-2.453	-2.700	-2.456	-2.154	-2.113
Número de valores negativos	521	516	498	500	509	499	510	500	484	497
% de sequías	50.6	50.2	48.6	49.0	50.1	49.5	50.8	50.2	49.1	51.1
De los tipos de sequías										
% de sequías leves	34.3	33.6	29.7	30.4	33.1	32.3	33.1	32.1	30.8	31.3

% de sequías moderadas	8.7	9.6	12.0	11.4	9.9	10.9	10.1	9.8	10.2	12.1
% de sequías severas	4.9	5.6	5.4	5.3	5.0	4.5	6.2	7.1	7.2	7.3
% de sequías extremas	2.7	1.4	1.6	2.0	2.1	1.8	1.5	1.1	1.0	0.3

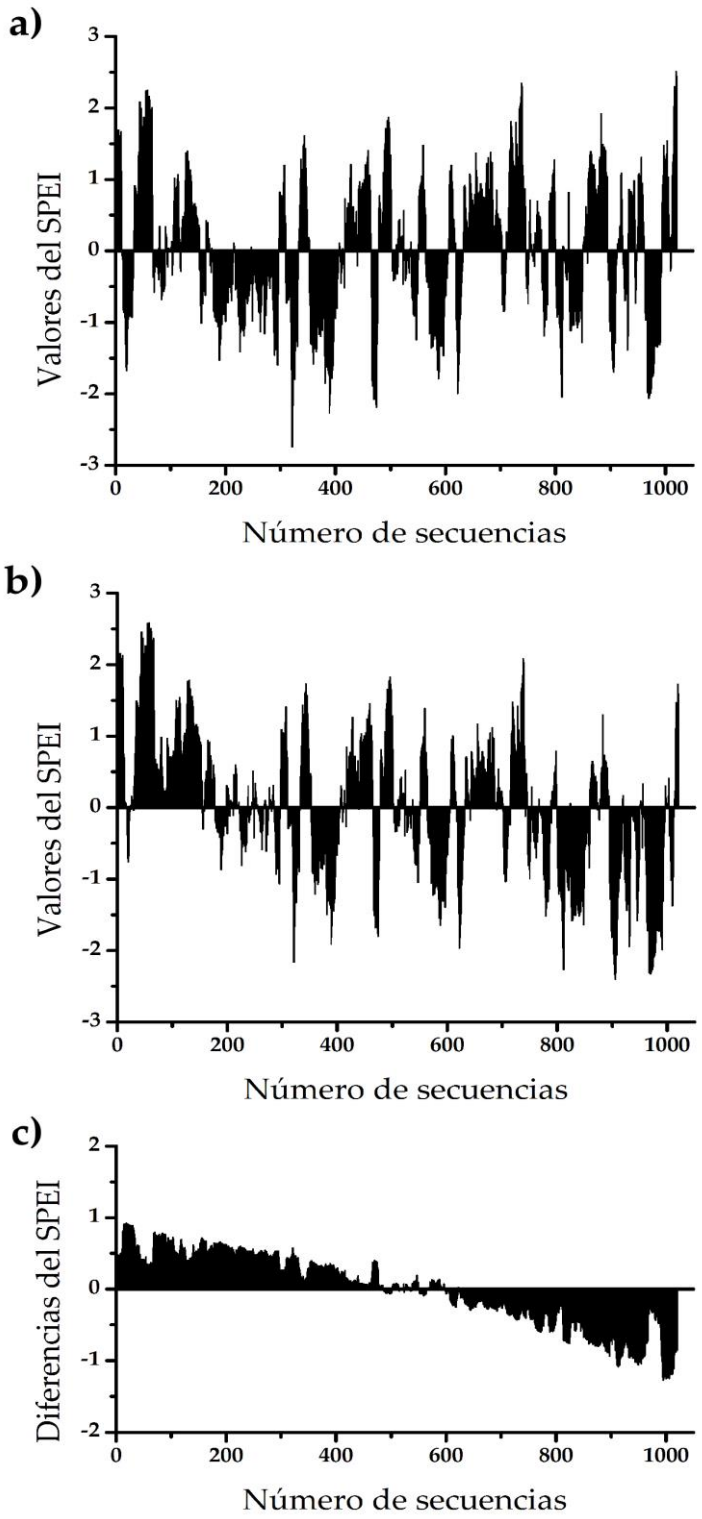

Figura 1. (a) Evolución del SPEI de 12 meses de duración en la estación climatológica Zacatecas, del estado de Zacatecas, México; (b) evolución

del SPEI (*k* = 12 meses) con reducción de 20% en la precipitación anual y aumento de 4 °C en la temperatura media anual, y (c) diferencias entre los SPEI mostrados (b-c).

Tabla 4. Número de eventos y porcentajes de cada tipo de sequía obtenidos con el SPEI de 24 meses de duración en los registros históricos (Tabla 2) y su contraste con los alterados por cambio climático probable.

Tipos de sequías y valor mínimo del SPEI	**Cuadro 2**	**Reducción de la precipitación**	**Aumento de la temperatura**	**Cuadro 3 efectos combinados**
Leves	323 (32.0%)	357 (35.4%) >	356 (35.3%) >	326 (32.3%) >
Moderadas	114 (11.3%)	90 (8.9%) <	88 (8.7%) <	110 (10.9%) <
Severas	58 (5.7%)	53 (5.3%) <	60 (5.9%) >	45 (4.5%) <
Extremas	13 (1.3%)	21 (2.1%) >	18 (1.8%) >	18 (1.8%) >
SPEI	-2.334	-2.401	-2.547	-2.453

Los resultados mostrados en la Tabla 4 indican que, de manera general, las sequías leves y extremas aumentarán como consecuencia del cambio climático probable; en cambio, las sequías moderadas y severas disminuirán. En estas conclusiones existe una anomalía en las sequías severas del registro con incremento de temperatura, que también aumentan. Respecto a los valores extremos del SPEI, se consideran acordes con las modificaciones impuestas a los registros históricos. Para el tercer escenario, el más crítico, se definen en la Tabla 3, como resultados más exactos, los de la duración de 18 meses, con los siguientes porcentajes para los cuatro tipos de sequías buscadas: 33.1, 9.9, 5.0 y 2.1%.

En la Figura 1b se expone la evolución del SPEI de 12 meses de duración en el registro que incluye ambos efectos del cambio climático; se observa claramente cómo las sequías aumentarán en duración y severidad hacia el final del registro, disminuyendo de forma notable los

lapsos húmedos. Por último, en la Figura 1c se muestran las diferencias del SPEI de la Figura 1b menos la Figura 1a.

Conclusiones

Los resultados del SPEI con los registros históricos de la estación climatológica Zacatecas (Tabla 2), ubicada en la capital del mismo nombre, del estado de Zacatecas, México, definen de forma aproximada un 32.2, 11.5, 5.0 y 1.3% de sequías leves, moderadas, severas y extremas, respectivamente. Estos porcentajes y los siguientes se obtuvieron con base en las duraciones de sequía de 12 a 30 meses.

En los tres escenarios planteados de cambio climático se encuentra que, de manera general, las sequías leves y extremas aumentan de forma somera, y que las sequías moderadas y severas disminuyen también de modo escaso en número o porcentaje. Se definen de forma global para el tercer escenario (Tabla 3), el más crítico, por conjugar reducción de precipitación y aumento de temperatura media, un 32.7, 10.5, 4.8 y 2.0% para cada tipo de sequía.

Las gráficas de evolución del SPEI, como las mostradas en la Figura 1 para una duración de sequías de 12 meses, permiten visualizar y definir de manera precisa los periodos de sequía, así como sus valores puntuales máximos o extremos; lo anterior, tanto en el registro histórico como en los alterados por cambio climático probable.

Al tomar en cuenta lo consistente de los resultados de este estudio, se recomienda la aplicación sistemática del SPEI en la cuantificación de las sequías históricas y futuras; las primeras basadas en los registros históricos disponibles; y las segundas, en sus versiones modificadas, que se deben plantear, de acuerdo con los posibles efectos del cambio climático en cada zona o región del país.

En los escenarios del cambio climático que se consideren factibles de ocurrir, los resultados del SPEI pueden ayudar a poner en perspectiva su impacto en el balance hídrico de una región; pero siendo desconocido

cómo evolucionarán exactamente las sequías en el futuro, los resultados del SPEI sólo pueden ser considerados orientativos.

Referencias

Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., & Latorre, B. (2014). Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, 34(10), 3001-3023.

Campos-Aranda, D. F. (2005). Estimación de la evapotranspiración y análisis de la precipitación. Capítulos 3 y 4. En: Autor (ed.). *Agroclimatología Cuantitativa de Cultivos* (pp. 65-120). México, DF, México: Editorial Trillas.

Campos-Aranda, D. F. (2015). Contraste de los índices DPP, SPI y RDI para clasificación de sequías, en la estación climatológica Zacatecas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(1), 183-193.

Davis, P. J. (1972). Gamma Function and related functions. Chapter 6 (pp. 253-296). In: Abramowitz, M., & Stegun, I. (eds.). *Handbook of Mathematical Functions.* New York, USA: Dover Publications.

Fuchs, B. A., Svoboda, M. D., Wilhite, D. A., & Hayes, M. J. (2014). Drought indices for drought risk assessment in a changing climate. Chapter 12 (pp. 217-231). In: Eslamian, S. (ed.). *Handbook of Engineering Hydrology. Modeling, Climate Change and Variability*. Boca Raton, USA: CRC Press.

Haktanir, T. (1991). Statistical modelling of annual maximum flows in Turkish rivers. *Hydrological Sciences Journal*, 36(4), 367-389.

Hao, Z., & Singh, V. P. (2015). Drought characterization from a multivariate perspective: A review. *Journal of Hydrology*, 527, 668-678.

Ma, M., Ren, L., Yuan, F., Jiang, S., Liu, Y., Kong, H. & Gong, L. (2014). A new standardized Palmer drought index for hydro-meteorological use. *Hydrological Processes*, 28(23), 5645-5661.

Machiwal, D., & Jha, M. K. (2012). *Hydrologic Time Series Analysis: Theory and Practice*. Dordrecht, The Netherlands: Springer.

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to times scales. *8th. Conference on Applied Climatology* (pp. 179-184), Anaheim, California, United States of America.

Mavromatis, T. (2007). Drought index evaluation for assessing future wheat production in Greece. *International Journal of Climatology*, 27(7), 911-924.

Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202-216.

Montero, M. J., Martínez, J., Castillo, N. I., & Espinoza, B. E. (2010). Escenarios climáticos en México proyectados para el siglo XXI: precipitación y temperatura máxima y mínima. En: Martínez, P. F., & Patiño, C. (eds.). *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México* (pp. 39-63). Volumen III. Jiutepec, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Palmer, W. C. (1965). *Meteorological Drought* (Research Paper No. 45) (58 pp.). Washington, DC, USA: US Weather Bureau.

Pandey, R. P., Sharma, K. D., Mishra, S. K., Singh, R., & Agarwal, A. (2008). Drought characterization. Chapter 21 (pp. 761-792). In: Singh, V. P. (ed.). *Hydrology and Hydraulics*. Highlands Ranch, Colorado, USA: Water Resources Publications.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, SARH. (1980). *Boletín Climatológico No. 3. Región Hidrológica No. 37. El Salado.* México, DF, México: Subsecretaría de Planeación, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

Stagge, J. H., Tallaksen, L. M., Gudmundsson, L., Van Loon, A. F., & Stahl, K. (2015). Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, 35(13), 4027-4040.

Stedinger, J. R., Vogel, R. M., & Foufoula-Georgiou, E. (1993). Frequency Analysis of Extreme Events. Chapter 18. In: Maidment, D. R. (ed.). *Handbook of Hydrology* (18.1-18.66). New York, USA: McGraw-Hill, Inc.

Törnros, T., & Menzel, L. (2014). Addressing drought conditions under current and future climates in the Jordan River region. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(1), 305-318.

Tsakiris, G., & Vangelis, H. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9/10, 3-11.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718.

Wells, N., Goddard, S., & Hayes, M. J. (2004). A self-calibrating Palmer drought severity index. *Journal of Climate*, 17(12), 2335-2351.

World Meteorological Organization, WMO. (1971). Annexed III: Standard tests of significance to be recommended in routine analysis of climatic fluctuations. In: *Climatic Change* (Technical Note No. 79; WMO-No. 195). (pp. 58-71). Reprinted. Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization.

Wu, H., Svoboda, M. D., Hayes, M. J., Wilhite, D. A., & Wen, F. (2007). Appropriate application of the Standardized Precipitation Index in arid locations and dry seasons. *International Journal of Climatology*, 27(1), 65-79.

Zelen, M., & Severo, N. C. (1972). Probability Functions. Chapter 26. In: Abramowitz, M., & Stegun, I. (eds.). *Handbook of Mathematical Functions* (9th printing) (pp. 925-995). New York, USA: Dover Publications.